



L'intelligence du geste robotique

Alain Dutech

► To cite this version:

Alain Dutech. L'intelligence du geste robotique. Michel Guérin. Le Geste entre émergence et apparence, Presses Universitaires de Provence (PUP), 2014, 978-2-85399-953-3. hal-01260210

HAL Id: hal-01260210

<https://inria.hal.science/hal-01260210>

Submitted on 21 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'intelligence du geste robotique

Alain DUTECH

Contexte :

Proposition d'article (**38.000 signes**)

Intervention donnée dans le cadre du Colloque *Le geste entre émergence et apparence : éthologie, éthique, esthétique*, tenu à Aix, les 22-23 mars 2013 ([organisé par le LESA](#)) / ss la dir de Michel Guérin.

Sommaire :

1. Le geste entre émergence et apparence

Apparence – Emergence – Cognition Incarnée

2. Robotique Cognitive

Geste balbutié – Geste motivé – Geste planifié

3. Obstacles à la cognition incarnée

Question épistémologique – Question théorique – Question métaphysique

Auteur :

Alain Dutech est chargé de recherche en Intelligence Artificielle pour l'INRIA et travaille dans l'équipe MaIA du Loria de Nancy.

Depuis 1999, il est docteur de l'école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace avec un manuscrit intitulé « Apprentissage d'environnement : approches cognitives et comportementales ». Il a obtenu son habilitation à diriger des recherches en 2010 à Nancy.

Auteur et co-auteur de 7 articles de journaux scientifiques et de 25 articles de conférence, il s'intéresse au domaine de l'apprentissage en Intelligence Artificielle et en Robotique, avec comme ligne de mire une meilleure compréhension des mécanismes de la cognition.

L'intelligence du geste robotique

Alain Dutech

Le cadre général de cet article est celui de la recherche sur l'intelligence artificielle dont l'un des objectifs¹ est de comprendre les mécanismes de la cognition humaine. Ce domaine de recherche se caractérise par la méthode qu'il utilise afin de prouver la validité d'un concept ou d'une théorie : il tentera de la mettre en œuvre dans l'élaboration d'un artefact intelligent (artefact devant s'entendre comme produit technologique concret). Ce procédé débouche rapidement sur un cercle vicieux car, dans le but de comprendre l'intelligence, on construit des objets dans lesquels on introduit des mécanismes et des processus devant conduire ces objets à développer des comportements intelligents, puis on observe et analyse ces comportements pour évaluer leur intelligence effective alors que ce concept n'a jamais bénéficié d'une définition ou d'une caractérisation liminaires ; cela revient à « définir », ou plutôt « ne *pas* définir », l'intelligence comme la propriété de ce qui *nous* paraît *a posteriori* intelligent. Sans évacuer ce problème soulevé entre autres par Turing dès les premiers pas de l'informatique et sur lequel nous reviendrons par ailleurs, la communauté scientifique considère que nous sommes, en tant qu'êtres humains, assez intelligents pour évaluer l'intelligence d'un artefact, d'autant que nous essayons pour l'instant de doter ces machines artificielles de fonctions cognitives simples et limitées, en principe plus aisément évaluables et identifiables... Il est donc possible de tenter d'avancer sur la compréhension des *mécanismes* de la cognition en menant en parallèle l'étude de la *notion* de cognition. Nous pouvons maintenant nous pencher avec plus de détails sur les robots qui sont les objets artificiels construits par les scientifiques pour étudier les mécanismes et processus de la cognition.

« Le geste entre émergence et apparence »

Quand il m'a été proposé de participer à cet ouvrage, cet intitulé m'a tout de suite interpellé car il m'est apparu comme une synthèse on ne peut plus concise de la problématique scientifique qui est

¹ Ces différents objectifs sont notamment présentés et discutés dans Stuart Russel & Peter Norvig, *Artificial Intelligence : A Modern Approach*, Prentice Hall, 1995 et dans Jack Copeland, *Artificial Intelligence: A Philosophical Introduction*, Wiley-Blackwell, 1993.

au cœur des mes travaux en intelligence artificielle, et plus particulièrement en robotique cognitive. Afin de développer ce point, et ses conséquences, il convient de définir ce que j'entends par « geste », « apparence » et « émergence ».

Le geste est une combinaison d'un mouvement et d'une intention (au sens de l'intentionnalité de Dennett²). Le mouvement sert à *quelque chose*, l'émetteur du mouvement étant conscient ou non de ce fait. Le mouvement constitue l'essentiel de la partie sensible du geste, c'est le phénomène auquel ont accès, en partie et en première approximation, les autres ainsi que l'émetteur du geste. Si un robot doté d'un bras se saisit d'un objet, alors, en tant qu'être humain, je peux voir ce mouvement, évaluer la distance parcourue par le bras, sa vitesse. Il m'est éventuellement possible, mais difficile et complexe, de connaître la force générée par le mouvement (ce dont le robot, qui est ici l'émetteur, peut éventuellement être conscient). Par contre le pourquoi, la cause, le déclencheur, l'enchevêtrement des mécanismes cognitifs ayant mené à ce geste me sont généralement inaccessible et j'en suis réduit à essayer d'en deviner ou d'en déduire la raison, la motivation ou le fait que l'émetteur soit lui-même conscient de ses éventuelles motivations et raisons.

L'apparence est l'ensemble des propriétés et des caractéristiques qui sont accessibles, au sens de « pouvant être perçues ». Il y a des aspects de l'apparence qui sont plus objectifs, que l'on peut mesurer scientifiquement, et d'autres plus subjectifs. Ainsi, le mouvement, par ses caractéristiques physiques sensibles, est un premier élément constituant l'apparence du geste. Un deuxième niveau pourrait qualifier une *manière*, dans les effets qu'elle induit chez l'observateur, renvoyant à un jugement de sa part. Est-ce un geste joli, agréable, élégant, souple, voire « intelligent » ? On touche là à une question importante et centrale de l'intelligence artificielle, qui nécessiterait d'être abordée plus longuement : les apparences permettent-elles de qualifier le degré d'intelligence d'un être ou d'un artefact ? Le problème est posé par Turing³ en 1950 avec son « jeu de l'imitation » où il s'agit, pour un être humain communiquant avec deux sujets X et Y par le biais d'un clavier et d'un écran, de déterminer lequel des deux est une femme et lequel est un homme et de voir si les probabilités de succès de l'observateur sont modifiées si l'un des deux sujets est en fait remplacé par une « machine ». C'est par la mise en place de cette procédure⁴ que Turing propose en substance une

2 Daniel Dennett, *La diversité des esprits. Une approche de la conscience ?*, Paris, Hachette, 1998.

3 Alan Turing, « Computing machinery and intelligence », dans *Mind*, vol 59, n° 236, Oxford University Press, octobre 1950, pp 433-460.

4 Au sein de cette procédure, l'ordinateur est mathématiquement défini comme une « Machine de Turing ». Alan Turing. « On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem* », dans *Proceedings of the London Mathematical Society*, Vol 2, N° 42, 1936, pp. 230-265.

formalisation⁵, c'est-à-dire une traduction en un énoncé qui se veut précis, concis et sans ambiguïté, de la question « Est-ce qu'une machine peut penser ? ». Parmi les nombreux sujets de discussion soulevés par cette démarche, la question des liens entre l'apparence et l'essence (la capacité de penser) est fondamentale. Elle a d'ailleurs été mise en exergue par Searle⁶ en 1980 qui ré-utilise l'expérience de pensée de la « Chambre Chinoise », arguant du fait qu'une machine réussissant le « jeu de l'imitation » (et donc intelligente au sens du test de Turing qui s'appuie sur les apparences), était en fait incapable de « comprendre » la conversation ainsi orchestrée (et donc échouait à atteindre l'essence d'une véritable intelligence).

Le concept d'émergence est tout aussi délicat à définir et à cerner. A l'image d'autres disciplines scientifiques, comme la physique ou la biologie, un processus est qualifié d'émergent s'il est non irréductible à ce dont il procède, signifiant par là que les propriétés et les caractéristiques de ce processus ne sont pas uniquement liées aux propriétés et aux caractéristiques des différents sous-processus et sous-systèmes qui le composent ou le précèdent. L'exemple le plus cité est celui d'une colonie de fourmis qui est capable de trouver le plus court chemin entre la fourmilière et une source de nourriture. Individuellement, aucune fourmi ne sait ce qu'est un plus court chemin, aucune fourmi ne dispose d'une carte de son environnement ou des capacités cognitives lui permettant de calculer ou de planifier ce plus court chemin. Par contre, chaque fourmi laisse derrière elle, sur le sol, une trace olfactive par le biais de ses phéromones, trace à laquelle les autres fourmis sont sensibles et qui les attire : toutes choses égales par ailleurs, une fourmi aura plus tendance à suivre une trace plus forte, plus marquée – due à un passage répété d'autres fourmis. Or, parmi tous les trajets vers la nourriture, le trajet le plus court sera emprunté plus souvent puisqu'il faut moins de temps pour le parcourir, il va donc progressivement être plus marqué que les autres, et de plus en plus, pour finalement être emprunté par la majorité des fourmis. La découverte du plus court chemin par les fourmis ne s'explique pas uniquement par les propriétés des fourmis, il faut aussi tenir compte du fait que le système s'est auto-organisé au travers des interactions entre ses différents éléments, que sont les fourmis, la fourmilière, la nourriture, le sol, etc.

5 Ainsi, on peut lire dans l'article de Turing : « We now ask the question, "What will happen when a machine takes the part of A [the man] in this game?" Will the interrogator decide wrongly as often when the game is played like this as he does when the game is played between a man and a woman? These questions replace our original, "Can machines think?" ». Alan Turing, « Computing machinery and intelligence », dans *Mind*, vol 59, n° 236, Oxford University Press, octobre 1950, p 434.

6 John Searle, « Minds, Brains and Programs », dans *Behavioral and Brain Sciences*, 3: 417–57, 1980. Le cœur de l'argumentation consiste en une simulation imaginaire d'un ordinateur par un humain. Cet ordinateur doit passer un test de Turing en Chinois. L'humain dans la Chambre Chinoise « suit » les instructions d'un programme qui lui indique dans son langage comment « manipuler » les symboles chinois. L'humain donne l'apparence de comprendre le Chinois mais n'accède en rien à une véritable compréhension du Chinois.

Par de nombreux aspects, le domaine de la robotique interroge et interpelle le geste, son apparence et parfois son émergence. Ainsi, en robotique « classique », un geste est généralement établi comme étant une suite de petits mouvements résultant d'une séquence de commandes calculées pour arriver à un but déterminé, dans une position donnée. Il faut pour cela disposer d'un modèle précis de l'environnement (la position et la forme de chaque élément du monde doivent être connus au millimètre près) et du robot (ses paramètres dynamiques, cinématiques). L'apparence du geste généré est prévisible, voire recherchée ; et en ce sens, on peut dire que l'apparence du geste *guide* l'élaboration de ses principes. Et même dans ce cadre normalement si prévisible et déterministe, il arrive parfois que des gestes *émergent*, inattendus, surprenants, car les mouvements résultants de l'interaction de règles ou de processus très simples (comme éviter un obstacle proche, être attiré par la lumière, ne pas dépenser trop d'énergie) peuvent conduire à une trajectoire parfaitement rationnelle bien que totalement imprévisible⁷.

Cette notion d'émergence est fondamentale pour les tenants de la théorie de la « cognition incarnée », mouvement apparu au sein du champ de l'intelligence artificielle dans les années 1990 par le biais de Brooks⁸ et de Dennett⁹. Ces derniers tiennent en effet l'intelligence (mais ils parlent plus aisément de « cognition de haut niveau ») pour une propriété émergente de l'animal évolué qu'est l'homme. Les capacités cognitives de haut-niveau, comme la maîtrise du langage, le raisonnement ou la pratique d'un sport collectif, *émergent* des capacités de plus bas niveau telles que la mémoire, la reconnaissance des visages, la projection dans le futur. A leur tour, ces capacités cognitives émergent de processus de plus bas niveau encore, et ainsi de suite. De plus, tous ces mécanismes et processus cognitifs, même au plus bas niveau, ne sont pas forcément présents à la naissance : si certaines capacités et aptitudes sont innées, comme le comportement réflexe de têter ou d'être attiré par les formes circulaires, la plupart vont se construire au fur et à mesure des expériences vécues. La pierre angulaire de cette construction est l'interaction continue entre l'être humain et son environnement, environnement qui comprend aussi les autres êtres humains.

7 Nous en avons personnellement fait l'expérience concrète et involontaire avec Nicolas Beaufort lors d'un travail de Master (non-publié). Les trajectoires « étranges » mais finalement optimales d'un robot ne correspondaient pas à nos calculs par simulation, mais ont été expliquées *a posteriori* en prenant en compte les interactions du processus principal de calcul de trajectoire avec les processus gardes-fou incorporés au robot (« réflexes » d'évitement d'obstacles).

8 D'abord proposé à la communauté de l'intelligence artificielle par un article en conférence (Rodney Brooks, « Intelligence without reason », dans *Proceedings of the Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, 1991) et mûri dans un livre (Rodney Brooks, *Cambrian Intelligence: the early history of the New AI*, The MIT Press, Cambridge, 1999).

9 Daniel Dennett, *La conscience expliquée*, Paris, Odile Jacob, 1993.

Or c'est essentiellement par le *geste* que l'interaction, et donc la cognition, est rendue possible; le geste qui permet à l'être humain, dès ses origines, d'agir sur ce qui l'entoure et de provoquer des retours sensibles qui vont nourrir ses processus cognitifs et les faire évoluer. Le geste est le vecteur d'une double relation entre l'apparence et l'émergence. D'une part, dans la théorie de la cognition incarnée, le geste est le produit imprévisible de l'émergence de nombreux processus cognitifs et seuls certains aspects de son apparence sont perçus et ressentis par l'émetteur et l'observateur du geste. D'autre part, les apparences ressenties vont à leur tour nourrir et stimuler d'autres processus cognitifs et finalement faire potentiellement émerger tout aussi bien de nouveaux gestes que de nouveaux processus cognitifs (dans des conditions idoines). Le contexte et les mécanismes participant à l'émergence possible de la cognition, au travers des différentes natures de gestes, font l'objet de la suite de cette réflexion.

La robotique cognitive

Argumenter pour une théorie de l'intelligence comme processus émergeant des interactions entre l'être humain et son environnement est des plus intéressants mais ne donne pas les clefs pour comprendre les éléments et les mécanismes qui permettent cette émergence. Le champ de la robotique cognitive aspire, entre autres, à prouver cette théorie et à définir, clarifier et expliciter les éléments qui participent à l'émergence de l'intelligence. Parce que le geste est nécessaire à l'interaction, la machine étudiée sera le robot, et pas simplement l'ordinateur dont les capacités gestuelles sont limitées, pour ne pas dire nulles. Nous cherchons à construire des robots par lesquels nous serons en mesure de démontrer que la combinaison de tels et tels processus, de tels et tels composants, permet l'émergence d'un comportement dénotant des capacités cognitives qui ne sont pas présentes en l'absence de l'un de ces composants ou processus. Il s'agit ici de « prouver par l'exemple », donc assez faiblement en somme, que la théorie de la cognition incarnée est plausible, voire possible et, peut-être, explicative. En effet, utiliser cette démarche pour construire une machine intelligente, dont les composants élémentaires (surtout cognitifs) sont aussi proches que possibles de ceux de l'homme, ne peut suffire à prouver que c'est par ce biais que l'homme acquiert et développe son intelligence, mais cela peut néanmoins constituer un premier pas des plus instructifs.

L'émergence de la cognition peut être vue comme l'édification d'une sorte de pyramide à degrés où la hauteur des degrés serait corrélée à la complexité des processus cognitifs mais aussi, comme nous

allons le voir, aux raffinements des gestes liés à ces degrés. Il faut d'abord établir la base de la pyramide avant de pouvoir commencer à édifier les degrés supérieurs, mais il n'est pas non plus nécessaire de terminer complètement un des étages avant de commencer à s'attaquer au suivant. Les différents blocs de cette pyramide sont autant de fonctions ou de processus cognitifs différents et il faut alors savoir quelle forme leur donner, comment les agencer, quel ciment utiliser. Une particularité de cette pyramide est qu'elle se construit elle-même à partir de sa base, de manière récursive, en utilisant ses propres éléments pour générer de nouveaux éléments. Ainsi, en reprenant certains des termes de Varela¹⁰ dont la théorie de l'enaction est très proche de celle de cognition incarnée, l'auto-organisation des éléments cognitifs, par un amorçage récursif¹¹, s'appuie sur des schèmes sensori-moteurs basiques et simples, archaïques dirait le philosophe, pour faire émerger de nouveaux processus cognitifs de plus haut niveau, permettant de mieux s'adapter à l'environnement en offrant un éventail de comportements plus riches, plus complexes, plus flexibles. Et j'aimerais proposer d'identifier trois niveaux différents de gestes correspondant aux trois premiers degrés de cette pyramide.

Le premier étage de la pyramide de l'émergence concerne ce que j'appelle les *gestes de balbutiement*. Ces gestes sont extrêmement simples, notamment dans leur manière de se générer puisqu'ils sont principalement involontaires, mal maîtrisés, comme dus au hasard. D'un point de vue robotique, on les obtient par exemple en produisant des commandes motrices (intensité électrique) aléatoires pour les différents moteurs et effecteurs du robot. Ces signaux électriques de commande vont provoquer des mouvements. Et ces mouvements, certains de leurs effets, ainsi qu'une partie des commandes peuvent être ressentis par le robot. Les comportements réflexes, obtenus par exemple en associant de manière automatique certaines commandes à certaines sensations (à l'image de la salivation en présence de nourriture ou du réflexe rotulien qui provoque une extension du tibia) sont une autre façon de provoquer des gestes sans (ou quasiment sans) capacité cognitive et que l'on peut mettre en œuvre assez facilement sur un robot. De fait, la difficulté de mise en œuvre dépend de la complexité de la sensation à détecter – il est facile de détecter qu'un bouton a changé de position, très difficile de détecter un visage dans une image – et de la complexité du mouvement à induire – activer violemment une articulation est simple, dessiner le visage qu'on aurait détecté est incroyablement complexe.

Ces gestes balbutiés ainsi produits permettent au robot de se doter des capacités de générer des

10 Francisco Varela, *Invitation aux sciences cognitives*, Paris, Seuil, 1996.

11 « Recursive bootstrapping ».

gestes plus précis, plus maîtrisés et ouvrant la voie à des comportements plus complexes, au travers de ce qu'on pourrait appeler, en référence au fonctionnement humain, des gestes motivés. Pour cela, plusieurs mécanismes cognitifs semblent nécessaires. En particulier, le robot doit se construire un ensemble de liens de cause à effet entre des commandes et les sensations qu'elles produisent. La mémorisation de ces associations, qui passe essentiellement par une capacité à détecter et mémoriser des corrélations, compose la base de la mémoire procédurale. La richesse des diverses sensations possibles et des mouvements possibles est telle que la démarche du roboticien devra permettre au robot de concilier deux enjeux antithétiques : détecter les schèmes sensori-moteurs *pertinents* (pour ne pas gaspiller du temps ou de la mémoire avec des gestes inutiles ou inefficaces) et néanmoins inventer constamment de nouveaux gestes (afin de rester adaptable à tout l'inconnu d'un espace sensori-moteur sans borne).

C'est aussi pendant cette étape que le robot commence le processus par lequel il va pouvoir progressivement distinguer les phénomènes sensibles sur lesquels il peut avoir de l'influence, de ceux sur lesquels son influence est minime, voire nulle. Par exemple, par ses commandes motrices, le robot peut modifier la pression sur son bras ou altérer l'image qu'il perçoit en faisant entrer son bras dans son champ de vision. Par contre, il a moins d'influence sur la chaleur issue du soleil ou le mouvement des feuilles dans les arbres sous l'action du vent. Ce processus, que l'on appelle *l'agentification*, permet au robot de se représenter son corps et son intégrité, en la distinguant du monde extérieur ; c'est l'un des premiers éléments pouvant potentiellement mener au processus d'émergence de la conscience de soi, notion importante dans l'élaboration de processus cognitifs de haut niveau¹².

Le deuxième étage de la pyramide renvoie aux *gestes motivés*. Le robot est encore dans une phase de découverte de ses capacités sensori-motrices, mais l'objectif est de commencer à guider l'apprentissage des gestes, d'une part pour répondre aux enjeux précités, mais aussi pour tirer parti de l'environnement et des autres pour apprendre. L'une des clés du geste motivé est le mécanisme de conditionnement, dont l'expérience de Pavlov¹³ avec son chien est archétypale : le geste de saliver est induit par la perspective d'une récompense ultérieure sous forme de nourriture annoncée par le son d'une cloche, et le chien apprend à associer la salivation au son de cette cloche. Plus important

12 Daniel Dennett, *La conscience expliquée*, Paris, Odile Jacob, 1993.

13 Réalisées dans les années 1890, les expériences de Pavlov ne sont connues en occident qu'en 1927 quand ses écrits sont traduits. Ivan Pavlov, *Conditioned reflexes*, London, Routledge and Kegan Paul, 1927.

encore est le mécanisme du conditionnement opérant, formalisé par Thorndike¹⁴ dans son l'étude du comportement des chats, mais sans doute plus connu par le biais de la boîte de Skinner¹⁵. Les rats, les pigeons et bien d'autres animaux sont capables de produire un geste – appuyer sur une pédale ou un bouton dans le cas de la boîte de Skinner – pour obtenir une récompense – la délivrance de nourriture – qui est perçue par le biais de ses effets – odeur de nourriture, puis satiété. Et l'apprentissage des liens entre le geste et la « récompense » est d'autant plus rapide et efficace que la motivation est grande pour l'animal.

Les mécanismes biologiques et intimes du conditionnement ne sont pas encore entièrement compris, mais dans le cadre de la robotique cognitive, des modèles formels sont mis en place. Sous l'appellation générale d'apprentissage par renforcement¹⁶, une multitude d'algorithmes et de schémas de calcul sont utilisables par des robots pour mettre en œuvre certaines propriétés désirées de cet apprentissage de gestes motivés. Sur quelques aspects, ces algorithmes sont plus performants que leur inspiration biologique – par exemple il est possible d'apprendre des séquences de gestes plus longues – mais ils ont encore de grosses lacunes, en particulier l'impossibilité de gérer des espaces sensori-moteurs aussi riches et complexes que ceux du règne animal. A ces mécanismes s'ajoutent aussi des mécanismes d'apprentissage de corrélation plus robustes au bruit (capable de détecter les associations statistiquement significatives) qui s'appuient, par exemple, sur des réseaux de neurones artificiels de type cartes auto-organisatrices de Kohonen¹⁷.

Apparaît alors à cette étape un processus clef encore mal connu et mal expliqué, à savoir l'apprentissage par imitation. Soit parce qu'un agent extérieur se saisit d'une partie du corps du sujet et le déplace, lui « montrant » ainsi en quelque sorte un geste intéressant, soit parce que le sujet perçoit de lui-même un geste qui le motive chez un agent extérieur, le sujet tentera alors de reproduire ce geste perçu ou ressenti. Il s'agit bien là de gestes motivés, mais en fait la complexité du mécanisme appelé globalement « apprentissage par imitation » dépasse l'étape de notre pyramide concernant les gestes motivés et pose de nombreuses questions que nous n'avons pas encore abordées. Quel est le mécanisme qui motive un être à imiter un geste ? Comment une telle motivation prend-elle le pas sur telle autre tout aussi présente (comme par exemple se sustenter) ? Qu'est-ce qui rend un geste perçu « intéressant » à imiter ? Suffit-il des seuls mécanismes d'exploration de l'espace sensori-moteur, même guidés par des motivations, couplés à un mécanisme

14 Edward Thorndike, *The Fundamentals of Learning*, AMS Press Inc, 1932.

15 Burrhus Skinner, *The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis*, Cambridge, Massachusetts, 1938.

16 Richard Sutton & Andrew Barto, *Reinforcement Learning*, Bradford Book, MIT Press, Cambridge, MA, 1998.

17 Teuvo Kohonen, « Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps », dans *Biological Cybernetics*, vol 43 (1), 1982, pp 59–69.

de mémoire associative, pour permettre la reproduction d'un geste perçu ? D'autres mécanismes, comme par exemple les gestes planifiés, que nous allons aborder lors de la prochaine étape, ne participent-ils pas aussi à cet apprentissage par imitation ? Dans ce cas, comment les différents mécanismes de production de gestes se coordonnent-ils, se synchronisent-ils, se complémentent-ils, s'organisent-ils ? L'apprentissage par imitation a subi un véritable engouement avec la mise en évidence de « neurones miroirs » chez les primates¹⁸. Ces neurones ont révélé une propriété remarquable chez les singes : si l'un (ou plutôt un groupe d'entre eux) est activé quand un singe effectue un geste particulier, ce même groupe sera aussi activé si le singe en question se contente d'observer, sans le faire, ce même geste effectué par l'un de ses congénères. C'est une piste intéressante à explorer pour mieux appréhender le ou les mécanismes mis en jeu, même si elle amène son cortège de nouvelles questions.

L'étage suivant de la pyramide de la cognition est celui du *geste planifié*. Le principe est de produire un geste pour atteindre un but donné. Cela peut sembler au premier abord un mécanisme similaire à celui du geste motivé mais la différence, essentielle et fondamentale, réside à la fois dans la manière de spécifier et de définir le but à atteindre, mais aussi dans les mécanismes fondamentaux qui semblent à l'œuvre à l'arrière plan. Le geste motivé, qui est presque un geste réflexe, visait à satisfaire une sensation interne de plaisir : tel geste apportait la satiété, la sensation de douceur, de chaleur, de bien-être... Le robot n'avait besoin que d'associer des commandes sensori-motrices à des « récompenses » ou des « punitions »¹⁹, un geste était « bien » ou « mal ». Avec le geste planifié, l'objectif n'est plus seulement de faire bien ou mal, mais d'obtenir un résultat précis, comme par exemple tracer un cercle, mettre l'extrémité d'un doigt dans une position donnée, etc. Il faut pour cela associer au geste les conséquences perceptives et sensibles et pas seulement un plaisir ou un déplaisir immédiat.

L'utilisation du terme « planifié » n'est pas anodine. Elle sous-entend que, par le développement de cette capacité à générer des gestes planifiés, même des gestes de très bas niveau comme saisir un objet, le porter à sa bouche ou autre, l'être cognitif ou le robot est en train d'acquérir des mécanismes que l'on retrouve dans les processus cognitifs de haut-niveau. Supposons en effet que le

18 Giacomo Rizzolatti & Laila Craighero, « The mirror-neuron system », dans *Annual Review of Neuroscience*, vol 27, 2004, pp 169–192.

19 Raccourcis rapides faisant référence à certaines substances (par exemple la dopamine dans le cas de sensations plaisantes et notamment de satiété ou la sérotonine dans le cas de douleur) qui sont produites par des neurones du cerveau et qui modifient la plasticité d'autres neurones, modulant de fait les capacités d'apprentissage et de mémorisation.

robot ait acquis une mémoire procédurale lui permettant d'associer à tout contexte sensori-moteur initial, un contexte sensori-moteur cible, défini comme la résultante de telle ou telle commande motrice. Comment générer un geste, ou plutôt une succession de commandes motrices, pour obtenir un effet voulu, comme par exemple saisir ce verre ? Il convient alors d'utiliser la mémoire pour anticiper, sans l'effectuer, le résultat de différentes commandes possibles, choisir ensuite celle qui semble permettre de s'approcher le plus de la situation finale visée, et recommencer ce choix à partir de l'hypothétique contexte sensori-moteur intermédiaire atteint par la mise en œuvre de cette première commande. Et ainsi de suite jusqu'à estimer que la situation atteinte à l'issue de cette suite de commandes, pour l'instant encore virtuelle, est bien conforme à l'objectif fixé. Ces étapes sont les bases du raisonnement : à partir d'une situation (actuelle ou imaginée), il faut anticiper les résultats de telle ou telle décision de manière virtuelle afin de choisir la meilleure d'entre elles et répéter l'opération jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant. L'acquisition du geste planifié est sans doute un élément cognitif important, lié à la capacité de raisonner, qui en deviendrait alors presque accessible...

C'est bien sûr exagéré. Un des écueils principaux qui a été identifié, à supposer que tout le reste soit faisable, est de nouveau l'extraordinaire richesse des commandes motrices possibles, même pour un robot dont la sophistication est loin d'égaler celle d'un être vivant. Dès lors, à un stade donné de la planification, il n'est pas possible d'anticiper mentalement les conséquences de toutes les actions possibles car elles sont en trop grand nombre ; et la décision en est faussée et arbitraire ; il se peut même que les décisions prises en début de planification ne permettent plus d'atteindre l'objectif fixé. Quelles sont les solutions ou les moyens pour contourner ce problème ? Pour l'humain, et dans le cadre du geste, une solution utilise la vision pour guider de manière continue la production du geste final : au fur et à mesure qu'un geste est effectué, il est possible d'évaluer *localement* la qualité du geste sans devoir attendre qu'il soit fini pour le comparer à l'objectif global. Par exemple, pour tracer un carré, on peut commencer par un segment (but plus simple à atteindre) et corriger ou recommencer immédiatement un geste qui, visiblement, s'écarterait de l'idée approximative d'une ligne droite. Le principe est de guider la production des gestes planifiés en permettant de fixer des sous-objectifs plus simples à atteindre et de corriger rapidement les écarts constatés et observables entre le geste prévu et le geste effectué. Planifier et exécuter une succession de gestes tout en les évaluant et les contrôlant, par exemple en les regardant, mobilisent une grande partie des capacités cognitives. Des processus d'habituation et d'agrégation, qui s'appuient encore une fois sur la capacité à détecter et mémoriser des schèmes sensori-moteurs, permettent d'agréger cette

succession de « petits » gestes planifiés en *un seul* geste, plus complexe. La suite de petits déplacements devient ligne, et les séquences de lignes deviennent carré. De l'existence et de la combinaison de plusieurs capacités cognitives (mémoire procédurale, geste motivé, geste planifié entre autres) peut, pourrait, devrait émerger une sorte de répertoire de gestes, favorisant à son tour l'émergence de nouveaux gestes plus complexes qui pourraient faire partie du répertoire, et ainsi de suite. Plus le répertoire s'agrandit, plus il contient des gestes complexes et de haut niveau, et plus il est en fait facile de planifier de nouveaux gestes si tant est qu'il soit possible d'exploiter la structure hiérarchique de ce répertoire de gestes, en commençant par combiner des gestes « complexes » mais rares, avant de rechercher des solutions, ou des briques de solutions, dans des gestes moins élaborés mais plus nombreux et variés. Des mécanismes de planification hiérarchique ont été proposés depuis longtemps en Intelligence Artificielle.

Notons que les mécanismes menant à l'établissement d'un répertoire gestuel complexe et hiérarchique (détecter et mémoriser des corrélations pertinentes, apprendre des associations sensori-motrices, planifier, etc) pourraient être appliqués en choisissant comme « espace de travail » non plus le domaine sensori-moteur, mais l'activité du système lui-même, *ie* le domaine neurologique, autant dire le cerveau. A la production de « gestes physiques » se substituerait alors la production de « gestes mentaux » et, dans le même temps, de représentations de plus en plus abstraites de l'activité du système. Il est d'ailleurs intéressant de noter que la zone cérébrale appelée *ganglions de la base* est considérée comme une région où le cerveau fait un choix parmi plusieurs actions possibles²⁰. Etant donné que plusieurs circuits cérébraux traversent ces ganglions de la base, ces choix semblent pouvoir concerner des gestes de bas niveau (quel doigt plier) comme de haut niveau (marcher, courir) mais aussi des émotions (peur ou panique) et des fonctions cognitives (mémoriser, se concentrer, arbitrer entre plusieurs motivations, etc).

C'est en ce sens que travailler à l'élaboration de cette pyramide cognitive, même dans le cadre restreint de la production de gestes apparemment simples, participe de l'étude des mécanismes fondamentaux de la cognition humaine. Si l'on arrive à construire un robot qui peut tirer parti des interactions physiques de bas niveau pour se constituer une panoplie d'actions motivées et planifiées plus complexes, on aura franchi quelques pas dans une direction qui, selon les tenants de la

²⁰ Suzanne Haber, « The primate basal ganglia: parallel and integrative networks », dans *Journal of Chemical Neuroanatomy*, vol 26, n° 4, 2003, pp 317–330.

cognition incarnée, conduit vers la compréhension de la cognition humaine.

Obstacles à la cognition incarnée

Outre le fait que la théorie de la cognition incarnée reste encore bien théorique et que la réalisation concrète d'une pyramide cognitive est encore largement hors de notre portée – d'autant que la présentation rapide que j'en ai faite a passé sous silence de nombreuses questions – sa démarche et les notions clefs d'apparence et d'émergence abordées ici peuvent aussi susciter quelques réflexions critiques.

Question épistémologique. La méthodologie actuelle de la robotique cognitive passe par la formalisation²¹ des différents processus cognitifs qui sont prêtés au robot, *ie* à l'informatique incarnée. Que l'on passe par l'informatique et la programmation ou par l'électronique, les processus que l'on construit sont formalisés, sont délimités, sont explicitement connus et descriptibles de manière à pouvoir être reproduits à l'identique par d'autres. Un des avantages de cette propriété est qu'il est alors possible de tenter de qualifier analytiquement, par le biais du raisonnement et des outils des mathématiques (au sens large), le comportement et les propriétés du processus. Pour la communauté scientifique, c'est un élément indispensable à la compréhension et donc à la démarche scientifique sous-jacente : on doit pouvoir réfuter, critiquer, améliorer, et ceci n'est possible que si l'étendue des propriétés du processus sont connues, explicables et comparables. Une des questions qui se pose néanmoins, d'autant plus crucialement dans un domaine qui touche à l'émergence car c'est une thématique mal maîtrisée et où les outils formels sont peu nombreux et peu puissants, est de savoir si la formalisation nécessaire et inévitable n'est pas en fait un obstacle qui ralentit, bride et contraint la recherche. Ainsi, dans l'histoire de l'intelligence artificielle, le champ des réseaux de neurones artificiels, le connexionisme, a été pénalisé pendant de longues années par l'analyse formelle de ses possibilités. En 1969, il est mathématiquement prouvé²² que le type de réseau de neurones artificiel le plus populaire à l'époque – le perceptron²³ – ne pouvait pas résoudre une tâche des plus simples, à savoir apprendre une fonction binaire comme le XOR. Il fallut attendre 15 ans,

21 Au sens large. Formalisation s'entend alors comme une ré-écriture sous une forme non-ambigüe et spécifique, afin d'autoriser des comparaisons, des reproductions et des échanges avec d'autres systèmes formels. La « forme » retenue ou le langage employé (équation, schéma, pseudo-code) importent finalement peu.

22 Marvin Minsky & Seymour Papert, *Perceptrons*, Cambridge, MA: MIT Press, 1969.

23 Frank Rosenblatt, « The Perceptron--a perceiving and recognizing automaton », dans *Report 85-460-1*, Cornell Aeronautical Laboratory, 1957.

avec la publication en 1986 d'un ouvrage²⁴ montrant et démontrant qu'il était possible, avec quelques modifications et des algorithmes plus complexes, d'utiliser le perceptron pour apprendre n'importe quelle fonction, pour que la recherche dans le domaine soit relancée. Or, dès 1969 la communauté savait que le perceptron pouvait faire plus que ce que l'analyse venait de démontrer, et ce fait était connu par Minsky et Papert. Cependant, le poids de cette analyse formelle fut tel que les recherches se sont quasiment arrêtées à l'époque, éclipsant par exemple les travaux de Werbos²⁵ qui, dès 1974, proposait l'algorithme donnant une solution au problème et qui ne sera reconnu qu'en 1986.

La question est donc de savoir si, à vouloir tout maîtriser et comprendre parfaitement, les outils formels ne sont pas aussi en train d'entraver la recherche en robotique cognitive. Si nous n'explorons que des voies que les mathématiques peuvent caractériser, combien de pistes seront ainsi laissées de côté ? Dès lors, dans ce domaine comme dans de nombreuses branches de l'intelligence artificielle, une grande partie des recherches est expérimentale, outrepassant largement le cadre des possibilités d'analyse des outils mathématiques. Des modèles permettant de mettre en œuvre, expérimentalement, des phénomènes émergents, sont proposés et seules quelques unes des nombreuses simulations de ces systèmes sont capables d'exposer, d'expliquer leurs propriétés. Dans la plupart des cas, la pratique impose son efficace, ses résultats avant que la théorie n'ait pu concevoir son cadre, sa formalisation. Et charge alors au théoricien d'essayer de construire les outils qui seront les plus à même de décrire, prédire, analyser les démarches qui paraissent les plus convaincantes empiriquement.

Question théorique. Une des contreparties de ces recherches qui sont essentiellement expérimentales est qu'il ne sera pas forcément aisé d'exploiter un éventuel succès de la robotique cognitive. Admettons que l'on puisse détecter et décider que tel comportement du robot montre qu'il a acquis, par émergence, des capacités cognitives évoluées le rapprochant du statut de créature intelligente, quels en seraient les enseignements réels et quelles connaissances pourrions-nous en retirer au delà de cette « preuve » empirique de la validité des idées de la cognition incarnée ? Comment savoir quelles interactions ont été cruciales pour favoriser cette émergence, quelle juxtaposition de composants et processus sont nécessaires, et lesquelles sont superflues ?

24 David Rumelhart, Geoffrey Hinton et Ronald Williams, « Learning representations by back-propagating errors », *Nature*, vol 323 (6088), 1986, pp 533–536.

25 Paul Werbos, *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences* [PhD thesis], Harvard University, 1974.

L'expérience sera-t-elle reproductible ? Et quand bien même le serait-elle, les questions précédentes y trouveraient-elles leurs réponses ? Et si elle n'est pas reproductible, qu'en penser ?

Au fond, ces réflexions concernent aussi l'émergence. Il est difficile de formaliser cette notion, et encore plus de se doter des outils formels d'analyse de ce phénomène. Même dans le cas où les scientifiques s'accordent à dire que l'on est bien en présence d'un phénomène ayant émergé, il n'y a pas de consensus sur les outils scientifiques qui permettraient de qualifier, quantifier ou mesurer cette émergence. A l'heure actuelle, les mécanismes internes de l'émergence, si tant est qu'il en existe des principes « universels », ne sont pas connus ni délimités, et nous sommes encore au stade où nous tentons de provoquer des phénomènes émergents et seulement ensuite d'observer – voire de découvrir – les effets macroscopiques émergents. Sauf dans quelques cas bien spécifiques et limités, comme la recherche d'un plus court chemin ou le fourragement de nourriture dont les solutions découlent de l'observation de la nature, nous sommes totalement incapables de partir d'un effet escompté et d'en déduire les composants et les relations microscopiques à mettre en place pour que cet effet finisse par émerger. Les recherches relatives aux facteurs d'influence sur l'émergence sont encore largement expérimentales, et à plus d'un titre : d'une part, nous en sommes réduits à faire des expériences pour observer l'influence de tel ou tel composant ou paramètre, de plus la mesure de l'influence est elle aussi à un stade assez expérimental. Et ces difficultés se retrouvent évidemment dans les recherches sur la cognition incarnée.

Question métaphysique. Le grand absent de cet article, alors même que sa présence est discriminante dans notre domaine, c'est le corps. Il y est vu comme inséparable du cerveau pour expliquer non seulement la « forme » de notre intelligence²⁶ mais aussi son apparition – et pourtant mon propos s'est essentiellement limité aux algorithmes possibles des mécanismes cognitifs, ce qui pourrait être appelé l'esprit²⁷, en un raccourci aussi osé que réducteur. Cette absence est symptomatique du faible nombre de travaux qui s'intéressent expressément à ce lien corps-cerveau dans le cadre de la robotique cognitive²⁸. Ces quelques travaux ont une portée limitée, et sont eux-mêmes contraints par la relative pauvreté du *hardware* disponible : là où le corps humain est

26 Rolf. Pfeifer & Josh Bongard, *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*, Bradford Books, MIT Press, 2006.

27 Marvin Minsky. *La société de l'esprit*, Paris, Interéditions, 1997.

28 Cette préoccupation est néanmoins présente dans le domaine, comme en témoignent le projet iCub visant à développer un robot « enfant », les travaux sur l'évolution conjointe du corps et du cerveau du robot par utilisation des algorithmes génétiques, ou encore les recherches sur une « robotique développementale » par laquelle les capacités physiques du robot (précision de la perception et du geste, par exemple) s'améliorent conjointement à l'évolution de ses capacités cognitives, etc.

une source de sensation d'une densité et d'une finesse indéfinies (chaque millimètre carré de peau apporte des sensations par exemple), les retours sensoriels des robots sont extrêmement peu nombreux (quelques valeurs de tension et d'intensité par moteur, quelques capteurs de distance et de pression). De plus, le *hardware* actuel ne permet pas au corps d'un robot d'évoluer et de se préciser au cours de sa « vie », ce qui serait nécessaire pour explorer certaines idées. Ils mettent néanmoins en exergue le fait que pour travailler sur l'émergence de la cognition, il faut considérer le système dans son ensemble, dans une approche holistique. Et c'est là un facteur qui ajoute à la complexité des études sur l'émergence en général et la cognition en particulier : il est illusoire de vouloir comprendre et analyser un élément indépendamment de son contexte, or c'est pourtant souvent la seule chose que nous sommes capables d'appréhender.

*

Ainsi en va t-il du geste robotique, dont on ne perçoit et ne mesure que l'apparence, espérant ainsi, à travers voire en dépit de celle-ci, approcher quelque peu l'essence du processus fondamental qu'est l'émergence. C'est là faire sienne l'une des hypothèses posée implicitement par le jeu de l'imitation de Turing : croire que l'apparence peut révéler un processus d'émergence – parier qu'un effet sensori-moteur peut permettre à l'observateur d'interpréter ou d'approcher l'essence d'un geste – c'est-à-dire, ici, espérer pouvoir remonter à la motivation voire aux capacités cognitives qui sont à la source de la production du geste.

Et c'est à cette entreprise audacieuse et peut-être utopique que la robotique cognitive essaie humblement d'apporter ses éléments de réponse : quelle relation se noue, s'institue entre l'apparence et l'émergence, par le vecteur du geste.

Bibliographie

- BROOKS, Rodney, « Intelligence without reason », dans *Proceedings of the 1991 International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1991.
- BROOKS, Rodney, *Cambrian Intelligence: the early history of the New AI*, Cambridge, MIT Press, 1999.
- COPELAND, Jack, *Artificial Intelligence: A Philosophical Introduction*, Blackwell, 1993.
- DENNETT, Daniel, *La conscience expliquée*, Paris, Odile Jacob, 1993.
- DENNETT, Daniel, *La diversité des esprits : Une approche de la conscience ?*, Paris, Hachette, 1998.
- HABER, Suzanne, « The primate basal ganglia: parallel and integrative networks », dans *Journal of Chemical Neuroanatomy*, vol 26, n° 4, 2003.
- HOLLAND, John, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Cambridge, MIT Press, 1992.
- KOHONEN, Teuvo, « Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps », dans *Biological Cybernetics*, 43 (1), 1982.
- MINSKY, Marvin, et PAPERT, Seymour, *Perceptrons*, Cambridge, MIT Press, 1969.
- MINSKY, Marvin, *La société de l'esprit*, Paris, Interéditions, 1997.
- PAVLOV, Ivan, *Conditioned reflexes*, London, Routledge and Kegan Paul, 1927.
- PFEIFER, Rolf, et BONGUARD, Josh, *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*, Cambridge, MIT Press, 2006.
- PIAGET, Jean, *La naissance de l'intelligence chez l'Enfant*, Paris, Delachaux et Niestlé, 1936.
- PIAGET, Jean, *Le comportement, moteur de l'évolution*, Paris, Seuil, 1976.
- RIZZOLATTI, Giacomo, et CRAIGHERO, Laila, « The mirror-neuron system », dans *Annual Review of Neuroscience*, vol 27, 2004.
- ROSENBLATT, Frank, « The Perceptron--a perceiving and recognizing automaton », dans *Report 85-460-1*, Cornell Aeronautical Laboratory, 1957.
- RUMELHART, David, HINTON, Geoffrey, et WILLIAMS, Ronald, « Learning representations by back-propagating errors », dans *Nature*, vol 323 (6088), 1986.
- RUSSEL, Stuart, et NORVIG, Peter, *Artificial Intelligence : A Modern Approach*, Prentice Hall, 1995.
- SEARLE, John, « Minds, Brains and Programs », dans *Behavioral and Brain Sciences*, 3: 417–57, 1980.
- SKINNER, Burrhus, *The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis*, New York, Appleton-Century-Crofts, 1938.
- SUTTON, Richard, et BARTO, Andrew, *Reinforcement Learning*, Cambridge, MIT Press, 1998.
- THORNIDKE, Edward, *The Fundamentals of Learning*, AMS Press Inc, 1932.
- TURING, Alan, « On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem* », dans *Proceedings of the London Mathematical Society*, Vol 2, N° 42, 1936.
- TURING, Alan, « Computing machinery and intelligence », dans *Mind*, vol 59, n° 236, Oxford University Press, Octobre 1950.
- VARELA, Francisco, *Invitation aux sciences cognitives*, Paris, Seuil, 1996.
- WERBOS, Paul, *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences* [PhD thesis], Harvard University, 1974.